

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211111058

# 基于一致危险性谱的砌体结构抗震性能分析\*

周强, 陈东, 肖晖, 余天昀, 赵文洋

(南昌大学工程建设学院, 江西 南昌 330031)

**摘要:** 地震危险性分析和地震动选择对结构抗震设计具有重要作用。一致危险性谱作为概率地震危险性分析的重要结果, 通常会被用来做目标谱以选择地震动记录。为改善概率地震危险性分析对震源传播特性考虑的不足, 基于随机有限断层模拟与概率地震危险性分析相结合的方法, 充分考虑震源机制、传播路径和场地放大效应的影响, 结合目标场地条件对历史地震进行模拟, 生成了同一超越概率下的一致危险性谱。分别以一致危险性谱和规范谱为目标谱, 各选择7条地震波, 对一典型砌体结构进行动力时程分析。结果表明: 以不同目标谱选择地震动对结构的动力响应差别较大, 合理选择目标谱是十分有必要的; 一致危险性谱在短周期内谱值较高, 以其为目标谱使得短周期结构动力响应较大, 可为结构抗震设计提供参考。

**关键词:** 地震危险性分析; 地震动选择; 一致危险性谱; 随机有限断层; 砌体结构

**中图分类号:** TU37   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2022)06-1233-07

## Seismic Performance Analysis of Masonry Structures based on Uniform Hazard Spectrum

ZHOU Qiang, CHEN Dong, XIAO Hui, YU Tianyun, ZHAO Wenyang

(School of Infrastructure Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** Seismic hazard analysis and ground motion selection play an important role in seismic design of structures. As an important result of probabilistic seismic hazard analysis, the uniform hazard spectrum is usually used as a target spectrum to select ground motion records. In order to improve the deficiency of probabilistic seismic hazard analysis on source propagation characteristics, this paper presented a combination method based on stochastic finite fault simulation and probabilistic seismic hazard analysis. The influence of the hypocenter mechanism, seismic propagation path and site amplification effect was fully considered in the method. The historical earthquakes were simulated in combination with the target site conditions, and the uniform hazard spectrum under the same probability was generated. Selecting the uniform hazard spectrum and standard spectrum as the target spectrum, the dynamic time history analysis of a typical masonry structure was carried out by using seven input seismic waves. The results show that the ground motion obtained by different target spectra has a great influence on the dynamic response of the structures, indicating the importance of rational target spectra selection. The uniform hazard spectrum has a high spectral value in the short period. Taking it as the target spectrum makes the short period dynamic response of the structure larger, which can provide references for the seismic design of structures.

**Keywords:** seismic hazard analysis; ground motion selection; uniform hazard spectrum; stochastic finite fault; masonry structure

\* 收稿日期: 2021-11-11; 修回日期: 2021-11-18

基金项目: 国家自然科学基金(51968047, 51608249)、江西省重点研发计划项目(20161BBG70058)资助

作者简介: 周强(1983—), 男, 副教授, 博士。主要从事结构抗震及灾场仿真研究。E-mail: zhouqiang@ncu.edu.cn

## 引言

大量震害资料表明,地面强运动是造成结构破坏、诱发地质灾害的主要因素。强地震动的发生、传播和运动学特性是工程地震学的主要研究内容。科学合理预测、估计和模拟强地面运动是有效减轻地震灾害损失的有效途径。目前,基于地震学方法的强地面运动模拟分为确定性方法、随机方法和综合法<sup>[1]</sup>。相比较而言,基于随机方法的有限断层模型能够较好地模拟近场和大震的高频成分,因此,利用有限断层模型开展的地震动模拟和预测得到了广泛应用。例如,2016年H. Reza<sup>[2]</sup>利用随机有限断层法对2012年8月11日发生在伊朗西北部的Ahar地震进行模拟,结果表明,在工程感兴趣的频率下,观测波形和模拟波形具有很好的一致性。2017年M. C. Raghucharan等<sup>[3]</sup>利用EXSIM程序对2015年4月25日发生在尼泊尔的Gorkha地震进行模拟,生成的结果数据与实际数据吻合较好。2018年Q. C. Li等<sup>[4]</sup>利用随机有限断层模型模拟了2018年1月23日发生在阿拉斯加湾的地震,进一步证明了用于预测未来大地震的随机有限断层模拟是可靠的。2021年,王宏伟等<sup>[5]</sup>提出了一种基于有限断层理论的三维地震动模拟方法,并模拟了鲁甸地震,结果表明,合成的加速度时程波形与观测记录相似,且模拟记录PGA、0.05~10 s周期段PSA幅值和谱形与观测记录也有良好的一致性。

地震危险性分析是预测未来一定时间内研究区域将会遇到的地震动大小,或超过给定水平的地震动的概率。地震危险性分析是地震安全性评价的重要内容之一,而确定性地震危险性分析方法和概率性地震危险性分析方法是地震危险性分析的主要方法。1968年,C. A. Cornell建立了合理的数学模型来进行地震危险性分析,评估了给定场地可能遭遇的地震危险程度。1982年,章在墉、高孟谭<sup>[6]</sup>等将地震危险性分析引入我国,经高孟谭等人的改进,能够反映我国地震活动的时空异质性,并在我国地震区划和地震安全评价等工作中广泛应用。

地震动预测模型的选择是概率地震危险性分析的重要环节,而现有的预测模型对震源传播特性的考虑并不充分<sup>[7]</sup>。为改善概率地震危险

性分析对震源传播特性考虑的不足,本文基于随机有限断层模拟与概率地震危险性分析相结合的方法,充分考虑震源机制、传播路径和场地放大效应的影响,结合研究场地条件对历史地震进行模拟,生成同一超越概率下的一致危险性谱。分别以一致危险性谱和规范谱为目标谱,对一典型砌体结构进行动力时程分析,探讨基于随机模拟一致危险性谱开展砌体结构抗震分析的可行性。

## 1 随机有限断层模拟基本理论

随机有限断层法的思想是将发震断层划分为一系列子断层,将子断层看成点源,应用随机点源的方法,得到每个子源对场址的影响,考虑到每个子源破裂传播到场址的延时后,叠加合成场址的地震动时程<sup>[8]</sup>,即:

$$a(t) = \sum_{i=1}^{Nl} \sum_{j=1}^{Nw} a_{ij}(t + \Delta t_{ij}) \quad (1)$$

式中, $Nl$ 和 $Nw$ 是沿断层长度和宽度方向的子断层个数; $a_{ij}$ 是第*i*行、第*j*列的子断层产生的地震动; $\Delta t_{ij}$ 为相应的地震波传播的滞后时间。

随机有限断层法合成加速度是由一条有限带宽的高斯白噪声来表征地震动相位的随机特性,与考虑震源、传播路径和场地影响的幅值谱结合,通过傅里叶逆变换得到地震动时程<sup>[9]</sup>。其中,傅里叶幅值谱可表示为下式:

$$Y = E(M_{0ij}, f) \times P(R, f) \times G(f) \times I(f) \quad (2)$$

式中, $M_{0ij}$ 为第*i*行、第*j*列的子断层的地震矩; $R$ 为子断层到场址距离; $f$ 为频率; $E(M_{0ij}, f)$ 为震源谱<sup>[10]</sup>; $P(R, f)$ 为路径传递函数<sup>[11]</sup>; $G(f)$ 为场地效应函数<sup>[12-15]</sup>; $I(f)$ 为幅值谱类型函数,可控制合成地震动时程类型为加速度、速度或位移。

## 2 地震危险性分析

地震危险性分析是预测未来一定时间内研究区域将会遇到的地震动大小,或超过给定水平的地震动的概率。1968年,C. A. Cornell建立了合理的数学模型来进行地震危险性分析,评估了给定场地可能遭遇的地震危险程度。1982年,章在墉、高孟谭<sup>[6]</sup>等将地震危险性分析引入我国,简称为CPSHA。

CPSHA 是根据概率地震危险性分析的原理,基于我国复杂的潜在震源区模型,对地震活动性模型进行改进。

传统的概率地震危险性分析(PSHA)<sup>[16]</sup>需要进行大量的积分计算,本文选用的方法与其不同,仅需对模拟生成的地震动反应谱进行简单的统计分析,首先假设各周期点处的谱加速度峰值(PSA)满足对数正态分布,对其各周期点求其对数均值和对数标准差<sup>[17]</sup>:

$$\lambda_{Sa(T_j)} = \ln\left(\overline{Sa(T_j)} / \sqrt{1 + \delta_{Sa(T_j)}^2}\right) \quad (3)$$

$$\xi_{Sa(T_j)} = \sqrt{\ln(1 + \delta_{Sa(T_j)}^2)} \quad (4)$$

式中,  $\delta_{Sa(T_j)}$  为 PSA 的变异系数;  $Sa(T_j)$  为反应谱的谱值,则超越概率<sup>[17]</sup>可表示为:

$$P = 1 - \Phi\left(\frac{\ln(Sa_i(T_j)) - \lambda_{Sa(T_j)}}{\xi_{Sa(T_j)}}\right) \quad (5)$$

式中,  $\Phi(\cdot)$  为标准正态分布的累积概率密度函数; 下标  $i$  表示第  $i$  条地震动。

### 3 一致危险性谱

#### 3.1 场地介绍

2008年5月12日,四川省汶川县映秀镇发生面波震级8.0级地震,这次地震造成了重大的人员伤亡和巨大的经济损失,给人们带来惨痛的教训。本文以汶川地震震中位置为研究场地,考虑方圆200公里内地震对其的影响,其历史发生震级4级以上震源分布及研究场地位置如图1所示。

2012年,喻焱<sup>[18]</sup>利用构造的四川浅硬土层场地模型对汶川地区地震动进行随机模拟,模拟结果与

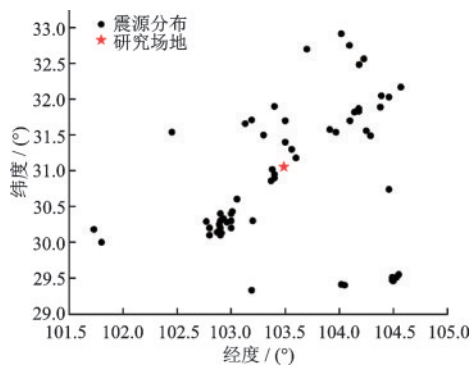


图1 历史地震及研究场地分布

Fig.1 Historic earthquake and study site maps

真实结果较为一致,采用的平均场地放大系数见表1。

表1 平均场地放大系数

Table 1 Average site amplification factor

频率/Hz	放大系数(基岩)	放大系数(土层)
0.01	1.00	1.00
0.10	1.07	1.10
0.30	1.24	1.26
0.60	1.58	1.60
1.00	1.93	2.60
2.30	2.80	3.63
5.00	3.60	4.50
10.0	4.57	6.00
30.0	5.50	6.00
100	5.50	6.00

#### 3.2 地震动模拟

本文采用 Motazedian 和 Atkinson 编制的动拐角频率 Fortran 程序 EXSIM 对研究区域历史地震进行模拟,所需的参数取值见表2,模拟结果如图2所示。

表2 模拟所需参数及其取值

Table 2 Simulation required parameters and values

参数	参数值
断层长度/km	$\lg L = -2.57 + 0.62M_w$
断层宽度/km	$\lg W = -0.76 + 0.27M_w$
子断层大小/km	$\lg \Delta L = -2.0 + 0.4M_w$
品质因子	$Q(f) = 256 \times f^{0.54}$
路径持时	0.05R
Kappa 参数	$\kappa = 0.04 s$
地壳剪切波波速/( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	3.7
地壳密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	2.8
几何衰减	$\begin{cases} \frac{1}{R}, & R < 70 \text{ km} \\ \frac{1}{70}, & 70 \text{ km} \leq R < 130 \text{ km} \\ \frac{1}{70} \sqrt{\frac{130}{R}}, & R \geq 130 \text{ km} \end{cases}$
应力降/bars	50
脉冲比/%	50
破裂速度/( $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$0.8 \times \beta$
窗函数	Saragoni-Hart
场地放大模型	见表1

### 3.3 地震危险性分析及一致危险性谱

通过计算不同周期处的超越概率,将相同超越概率的谱值连线,即可得到一致危险性谱。本文分别计算了50年超越概率2%和10%的一致危险性谱,将其与我国规范设计谱<sup>[19]</sup>进行比较,规范设计谱本质上也是一致危险性谱,50年超越概率2%和10%的一致危险性谱分别对应于规范中罕遇地震和设防地震设计谱,如图3所示,经对比可发现,生成的一致危险性谱与规范谱较为一致。

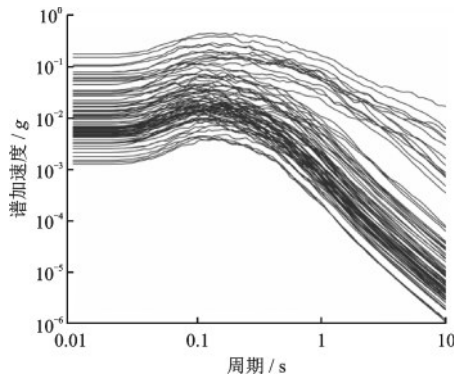


图2 模拟地震动反应谱

Fig.2 Simulated ground motion response spectrum

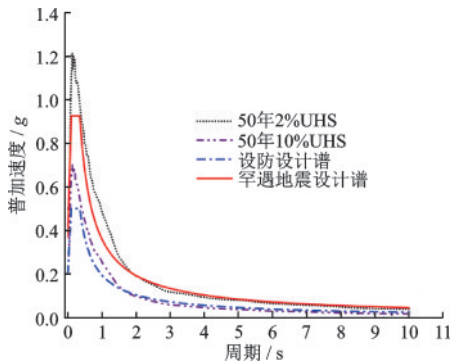


图3 反应谱对比图

Fig.3 Comparison of response spectra

## 4 典型砌体结构动力时程分析

### 4.1 有限元模型

本文选取了一栋带有震害的实际典型砌体结构(基本周期  $T=0.143\text{ s}$ )<sup>[20]</sup>作为算例,通过有限元软件ABAQUS建立了该砌体结构的有限元模型,采用整体式建模,建模时采用砌体强度等级为MU10,砂浆强度为M10。混凝土材料采用混凝土

损伤塑性(Concrete-Damage Plasticity)本构关系,根据《混凝土结构设计规范》<sup>[21]</sup>定义材料塑性,根据能量等效原理计算材料损伤参数<sup>[22]</sup>;混凝土构件和砌体采用实体单元C3D8R,混凝土材料墙体、楼板等各构件间采用tie连接。网格划分时,采用六面体单元,为保证计算精度和效率,网格尺寸为0.15 m。阻尼模型采用瑞利阻尼,阻尼比为5%。建立的有限元模型如图4所示。

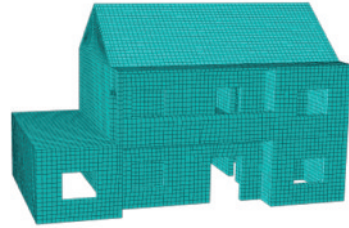


图4 房屋的三维有限元模型

Fig.4 3D finite element model of the building

### 4.2 地震波选择

本文分别以50年超越概率10%的一致危险性谱和与其对应的设防地震规范谱为目标谱,首先将目标谱上传到美国太平洋地震工程研究中心(PEER),各选择7条地震波记录,再利用Seismo-Match软件对其进行处理,挑选地震波信息见表3,处理后的反应谱如图5所示,其中,以一致危险性谱为目标谱选择的地震波编号为1~7,以规范谱为目标谱的选择的地震波编号为#1~#7。

### 4.3 损伤耗能

本文采用ABAQUS有限元软件的损伤耗能(Damage dissipation energy)指标来表征结构的累积损伤,通过该参数来分析不同工况下结构整体累积损伤的影响,其数学表达式为<sup>[23]</sup>:

$$E_D = \int_0^t \left( \int \frac{d_t - d}{1 - d} \sigma : \dot{\epsilon}^{el} dV \right) dt \quad (6)$$

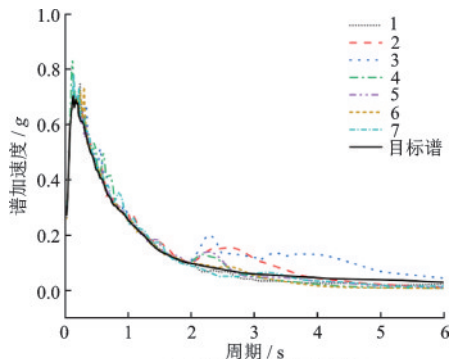
式中,  $\sigma$ 为应力;  $d_t$ 为当前损伤水平参数;  $d$ 为损伤参数;  $\dot{\epsilon}^{el}$ 为弹性应变率;  $V$ 为体积。

整体损伤耗能指标是衡量结构在地震动作用后损伤程度的重要参数,也是决定结构震后修复还是重建的重要参考指标之一,整体损伤耗能指标通过对整个结构的损伤耗能进行求和计算。本文对比了不同地震动作用下结构的整体损伤耗能情况,绘制了不同地震动作用下结构的整体损伤耗能曲

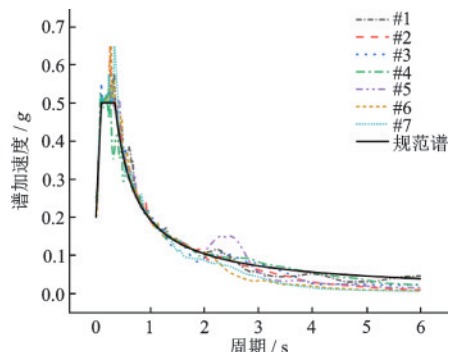
表 3 地震波记录

Table 3 Seismic wave recording

编号	PEER 编号	地震名称	时间	震级	截取时间/s
1	RSN-31	Parkfield	1966	6.19	14
2	RSN-57	San Fernando	1971	6.61	16
3	RSN-68	San Fernando	1971	6.61	14
4	RSN-72	San Fernando	1971	6.61	14
5	RSN-81	San Fernando	1971	6.61	15
6	RSN-95	Managua	1972	6.24	13
7	RSN-139	Tabas_Iran	1978	7.35	12
#1	RSN-17	Southern-Calif	1952	6.0	14
#2	RSN-58	San Fernando	1971	6.61	10
#3	RSN-94	San Fernando	1971	6.61	12
#4	RSN-121	Friuli_Italy-01	1976	6.5	11
#5	RSN-330	Coalinga-01	1983	6.36	14
#6	RSN-420	Ierissos-Greece	1983	6.7	11
#7	RSN-531	N.Palm Springs	1986	6.06	12



(a) 一致危险性谱为目标谱



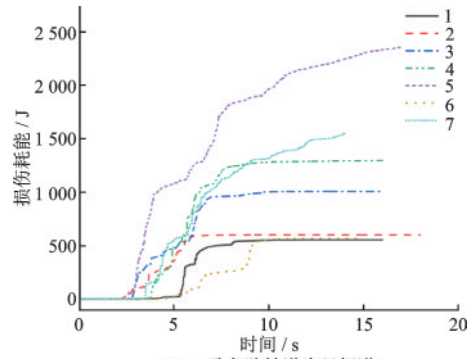
(b) 规范谱为目标谱

图 5 处理后的反应谱

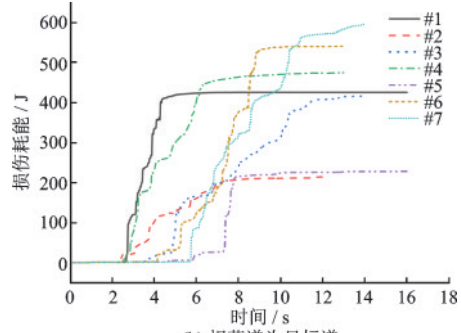
Fig.5 Post-treated response spectra

线,如图 6 所示。

由图 6 可知,经过处理得到的地震波,即便反应谱均与目标谱匹配较好,但是不同地震波作用下结构的损伤耗能仍然具有较大的差异,对于不同目标谱来说,响应的区别主要是由目标谱的谱值在基本



(a) 一致危险性谱为目标谱



(b) 规范谱为目标谱

图 6 损伤耗能

Fig.6 Damage energy dissipation

周期处不相同引起的。对于相同目标谱,不同地震波来说,虽各条地震波的反应谱谱值在基本周期处相同,但是结构在受到地震波作用时,结构发生破坏,周期延长,然而在新周期点处,各条地震波的反应谱谱值不同,引起结构反应的差异。说明利用多条地震记录来对结构进行抗震分析是非常有必要的。经过对比可知,相较于以规范谱为目标谱,以一致危险性谱为目标谱,分析得到的损伤耗能较高,结构破坏更严重。

#### 4.4 位移反应分析

文献[24]中的划分标准见表 4,表 5 给出了不同地震波作用下各楼层的最大层间位移角,对比可知,一致危险性谱为目标谱时,最大层间位移角均出现在一层,二层大部分处于中等破坏状态,取其平均值,即一层处于严重破坏状态,二层处于中等破坏状态。规范谱为目标谱时,最大层间位移角均出现在一层,且大部分处于中等破坏状态,只有两条地震记录下,处于严重破坏状态,二层大部分处于中等破坏状态,取其平均值,即两层均为中等破坏状态,且一层为中等偏重状态。由此可见,不同的目标谱会造成不同的分析结果,以一致危险性谱为目标谱,使得结构设计更偏于保守。

表4 砌体结构层间位移角限值

Table 4 Limit value of inter-storey displacement angle of masonry structure

震害等级	基本完好	轻微破坏	中等破坏	严重破坏
位移角限值	1/3 000	1/2 000	1/1 100	1/350

表5 最大层间位移角

Table 5 The maximum inter-storey displacement angle

一致危险性谱为目标谱			规范谱为目标谱		
加载地	第一层	第二层	加载地	第一层	第二层
震波编号	层间位移角	层间位移角	震波编号	层间位移角	层间位移角
1	1/1 277	1/1 538	#1	1/1 063	1/1 395
2	1/1 370	1/1 508	#2	1/1 765	1/2 714
3	1/915	1/1 250	#3	1/1 402	1/1 818
4	1/1 304	1/1 382	#4	1/1 316	1/1 538
5	1/898	1/1 071	#5	1/1 493	1/1 899
6	1/1 485	1/1 685	#6	1/1 007	1/1 235
7	1/744	1/1 075	#7	1/1 376	1/1 744
平均值	1/1 044	1/1 322	平均值	1/1 304	1/1 632

4.5 结构损伤分析

综合损伤耗能指标和层间位移角来看,一致危险性谱为目标谱时,1号地震波作用下,该结构反应较小,5号地震波作用下,该结构反应最为剧烈。规范谱为目标谱时,#2号地震波作用下,该结构反应较小,#6号地震波作用下,该结构反应最为剧烈。选用1号、5号、#2号与#6号地震波作用下的拉损伤云图来进行分析,损伤云图如图7所示。

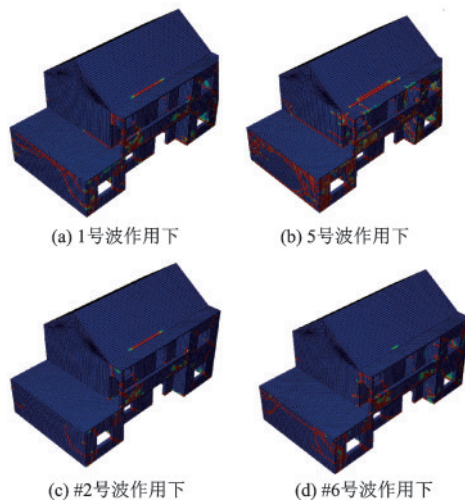


图7 损伤云图

Fig.7 Damage distribution map

由图7可以看出,以一致危险性谱为目标谱选择地震波,结构的拉伸损伤程度较重于以规范谱为目标谱的计算结果,以一致危险性谱为目标谱,使得结构设计偏于保守,可为砌体结构抗震设计提供补充参考。该房屋的门窗洞口、墙体连接处均出现大量裂缝,这是因为这些部位易出现应力集中现象,属于薄弱部位。墙体出现大量的斜裂缝和交叉斜裂缝,属于剪切破坏。从整体来看,一层的损伤状况明显重于二层,即该结构一层为薄弱层。

综上所述,从损伤耗能、位移反应和损伤云图来看,以不同目标谱选择地震动对结构的动力响应差别较大,以一致危险性谱为目标谱,分析得到结构的破坏偏重,可为结构抗震设计提供参考。

5 结论

基于随机有限断层模拟与概率地震危险性分析结合的方法,结合研究场地条件对历史地震进行模拟,生成了同一超越概率下的一致危险性谱。分别以一致危险性谱和规范谱为目标谱,再各选择了7条地震波。利用ABAQUS有限元软件对一栋典型砌体房屋进行了动力时程分析,采用损伤耗能、最大层间位移角及损伤云图等方面对该结构进行分析,并得到以下结论及建议:

(1)基于有限断层法和概率地震危险性分析的一致危险性谱与规范谱较为一致,短周期时,生成的一致危险性谱的谱值高于规范谱;长周期时,生成的一致危险性谱的谱值低于规范谱。针对砌体结构等短周期结构来说,以一致危险性谱为目标谱进行分析,结构破坏偏于严重,可为结构抗震设计提供参考。

(2)以不同目标谱选择地震动对结构的动力响应差别较大,即便以同一条目标谱选择地震动,结构的动力响应也会存在差异。因此,对结构进行动力分析时,合理选择目标谱和多条地震动记录是十分有必要的。

(3)由损伤耗能、层间位移角和损伤云图分析可知,该砌体结构的一层为薄弱部位,尤其是门窗洞口和墙体连接处,建议对一层进行加强,如增设圈梁、构造柱等。

参考文献:

[1] 王振宇. 高频地震动随机模拟方法研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2017.

- Wang Z Y. Research stochastic simulation method for high frequency of ground motions[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2017. (in Chinese)
- [2] Reza H. Stochastic finite-fault simulation of ground motion from the August 11, 2012,  $M_w$  6.4 Ahar earthquake, northwestern Iran[J]. Journal of Seismology, 2016, 20(2): 463-473.
- [3] Raghucharan M C, Surendra N S. Simulation of strong ground motion for the 25 April 2015 Nepal (Gorkha)  $M_w$  7.8 earthquake using the SCEC broadband platform[J]. Journal of Seismology, 2017, 21(4): 777-808.
- [4] Li Q C, Yuan S P, Zheng X J. Simulation of the  $M_w=7.9$  Gulf of Alaska earthquake on January 23, 2018, by the stochastic finite fault model[J]. Acta Geophysica, 2021, 69:415-425.
- [5] 王宏伟, 任叶飞, 温瑞智. 一种随机有限断层的三维地震动模拟方法—鲁甸地震为例[J]. 地震工程与工程振动, 2021, 41(2): 181-191.  
Wang H W, Ren Y F, Wen R Z. A modified stochastic finite-fault method for simulating ground motions in three dimensions: A case study of Ludian earthquake[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2021, 41(2): 181-191. (in Chinese)
- [6] 高孟潭. 地震危险性分析方法概述[J]. 国际地震动态, 1986(11): 11-14.  
Gao M T. An outline of the analytic methods for seismic risk assessment[J]. Progress in Earthquake Sciences, 1986(11): 11-14. (in Chinese)
- [7] Abrahamson N, Atkinson G, Boore D, et al. Comparisons of the NGA ground-motion relations[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 554-557.
- [8] 张冬锋. 随机有限断层法参数不确定性分析及其在近场地震动模拟中的工程应用研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2019.  
Zhang D F. Parameter uncertainty analysis of stochastic finite-fault method and its application in near-field ground motion simulation[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2019. (in Chinese)
- [9] 孙晓丹, 曾程, 杨成, 等. 基于有限断层随机地震动合成的高速路网地震危险性分析[J]. 工程力学, 2018, 35(4): 186-199.  
Sun X D, Zeng C, Yang C, et al. Seismic hazard analysis for highway network based on stochastic finite fault modeling of ground motions[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(4): 186-199. (in Chinese)
- [10] 孙吉泽. 基于随机有限断层法的最大可信地震研究[D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2019.  
Sun J Z. Maximum credible earthquake research based on stochastic finite fault method[D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2019. (in Chinese)
- [11] Atkinson G M, Mereu R F. The shape of ground motion attenuation curves in southeastern Canada[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1992, 82(5): 2014-2031.
- [12] Boore D M, Joyner W B. Site amplification for generic rock sites[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87(2): 327-341.
- [13] Anderson J G, Hough S E. A Model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies: Bull[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1984, 74(5): 1969-1993.
- [14] 张学明, 闫维明, 何浩祥, 等. 基于随机模拟一致危险性谱的核电厂抗震性能分析[J]. 原子能科学技术, 2018, 52(8): 1459-1467.  
Zhang X M, Yan W M, He H X, et al. Seismic performance analysis in nuclear power plant based on stochastic simulation uniform hazard spectrum[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2018, 52(8): 1459-1467. (in Chinese)
- [15] 杨泽, 盛俭, 金显廷, 等. 精河  $M_s$  6.6 地震近断层地震动模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(6): 1024-1036, 1052.  
Yang Z, Sheng J, Jin X T, et al. Simulation of near-fault ground motion of Jinghe  $M_s$  6.6 earthquake[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2020, 40(6): 1024-1036, 1052. (in Chinese)
- [16] 沈建文, 蔡长青, 邱瑛. 震级积分步长和危险性曲线控制点对地震危险性分析的影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2016, 36(5): 798-803.  
Shen J W, Cai C Q, Qiu Y. The effects of magnitude integral step and control points of seismic hazard curve on the seismic hazard analysis[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2016, 36(5): 798-803. (in Chinese)
- [17] 李思雨. 基于目标谱的西安地区地震动选择与调幅[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.  
Li S Y. Selection and scaling of ground motion records based on target spectra in Xi'an region[D]. Harbin: Harbin Institute Of Technology, 2016. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)

(下转第 1247 页)